

超短パルス発生技術の進歩は著しく、現在パルス幅（半値全幅）が 5 fs (5×10^{-15} s) の光パルスを発生できるようになっている。このまま順調に技術が発展した場合にどのような世界が待っているのだろうか。光速 c で 5 fs に進める距離は $1.5 \mu\text{m}$ なので、波長が 800 nm の場合これは 2 周期分に相当する。時間領域でこれだけ圧縮するとフーリエ変換の関係にある周波数空間では大きく広がりスペクトル幅は 300 nm に及ぶ。いま仮に 1 fs のパルス幅が達成されたとすると、スペクトル幅（半値全幅）は少なくとも 800 nm 必要であり（中心波長が 800 nm の場合）、このときパルス幅は中心波長の周期を下まわることになる。これを図示したものが図 1(a), (b) である。図示にあたり包絡線はガウス関数（点線）、振動項は正弦波とし、図の実線はそれらの積 $\exp(-at^2)\cos(\omega t - \phi)$ で与えられている。(a), (b) の違いは位相項 ϕ の違いで、(a) では $\phi = 0$ であり、(b) では $\phi = \pi/2$ である。図 1(a), (b) の違いから明らかなように、パルス幅が 1 周期分程度に狭くなると振動電場の波形は位相の違いで大きく異なる。比較のために、図 2 にパルス幅が周期に比べて十分に大きい場合を示す。(a), (b) の違いはやはり位相項の違い $\pi/2$ であるが、図から差異はわからない。パルス幅が周期程度のものをモノサイクルパルスと呼ぶが、その世界では式でみる限りほとんど同じものが、図示するとかなり異なる。その違いが何をもたらすか？ それを考えてみるのが本記事の主題である。

真空中を伝搬している場合は単に位相が違うだけで、特に何の違いも表れないであろうが、物質と相互作用する場合には何かあるかもしれない。線形現象の場合は光の振動に比例して物質内の電子が分極

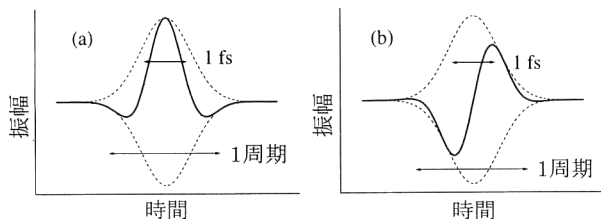


図1 パルス幅が中心波長の周期に比べて小さい場合。(a), (b) では位相が $\pi/2$ 異なる。矢印で示したパルス幅が包絡線の幅より小さいのは、パルス幅は通常電場の 2 乗の包絡線として定義されるが図では電場の包絡線を示しているからである。

するだけなので、やはり 2 つのパルスに違いは表れないであろうが、非線形現象では差が表れそうである。サッカーで例えれば、攻撃側がディフェンスをかわすのに右側にフェイントをかけ、左側に大きくそれた後戻ると ((a) に相当)、右・左とほぼ均等にそれながらドリブルしたのでは ((b) に相当) その効果は異なるであろう。光の世界でもこれに似て差が起こるかもしれない。まず非線形光学の教科書¹⁾ に立ち返ってみよう。光パルスを扱うのに通常 slowly varying envelope approximation と呼ばれる近似を用いる。これは周期に比べてパルス幅が十分に大きいことを仮定する近似で、図 2(a), (b) のようなパルスがこれに相当する。(a), (b) の違いは位相が $\pi/2$ 異なることであるが、違いはほとんどわからず、理論的にもこの近似の範囲内で (a), (b) に差はもたらさない。差が表れるのは図 1 のような場合に限られ、非線形光学の教科書を越えたこれからの課題である。現時点で検討済みなのは分子における高次高調波 (~ 200 次) の発生の問題で、(a), (b) の差が発生効率に大きな差をもたらすことを予言している²⁾。

図 1 のパルスが物質中を伝搬することを考える。群速度と位相速度が一致していれば (a), (b) のパルスはそれぞれの波形を維持したまま伝搬することがになる。すなわち、(a), (b) の分類が当を得ないことになる。このことを考慮すると、今後の研究のキーワードのひとつは「群速度と位相速度」になりそうである。実際、群速度と位相速度を考慮して slowly varying envelope approximation を論じた文献もある³⁾。

文頭で述べたように、現在実験的に発生可能なパルスは 2 周期分程度の幅のもので、これは波長 800

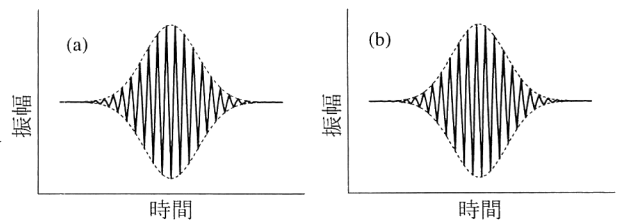


図2 パルス幅が中心波長の周期に比べて十分に長い場合。(a), (b) では位相が $\pi/2$ 異なるが、見た目にはほとんど差はない。

nm で発振するモード同期チタン・サファイアレーザーから直接、またはそれを種光にして生成される。この仕様はいくつかのグループで達成されているが、文献⁴⁾のものはとりわけ構成が単純で、このような極限技術に近い将来多くの人の手になることを予感させる。こういったモード同期レーザーの共振器内の群速度と位相速度は残念ながら一般に一致しておらず、出力のパルス列の位相は各パルスごとに異なる。図1の場合でいえば、パルスごとに(a)のときもあれば(b)のときもあり、またそれ以外の波形もある。実験において(a)と(b)の違いを見いだすためには、レーザー共振器内の群速度と位相速度を一致させることを実行しなければならない。これに対する試みはすでに行われているが、一筋縄ではいかないようである⁵⁾。

チタンサファイアレーザーはすぐれたレーザーでプロでなくても扱える代物である⁶⁾。いきなり5 fs は難しいとしても数十 fs であれば、既製品のほかキットとしての販売もあるし、また部品を集めて自作も可能であろう。超短パルスを発生させた後は波形・位相の評価が必要になる。これについてはいろいろな方法が提案実証されているが、frequency-resolved optical gating (FROG)法が現在最もよく知られている。これを行うにあたっての実験的な注意点は文献7)に教科書のごとく丁寧に書かれているし、位相の復元に使う繰り返し計算については文献7)が載った特集号の他の文献に論じられている。また計算プログラムは販売もされている。問題はFROG法等で求まる位相は中心波長に対する相対位相であることである。図1に示したような絶対位相の決定は、光源の課題と同様に今後の課題である。

以上、モノサイクルパルスにまつわる課題の出発点を述べた。最後に素朴な疑問をいくつか挙げてみる。

- (1) 1 fs のパルスを作るのには 800 nm 以上の帯域が必要であるが、どこからそのような利得帯域を得るのか？ 例えば、自由電子レーザーには可能性を見いだせるのか？ シンクロトロン輻射光の合波は可能か？
- (2) 物質が光と相互作用するとき物質は1周期以上の振動電場を受けることにより初めて周波数

を認識できるわけだが、パルス幅が中心波長の周期以下になると周波数を認識できないことになる。そのとき物質はどのような応答を示すのであろうか？ 時間軸上の近接場になっていないか？ フーリエ解析は破綻しないか？

- (3) 物質中を光パルスが透過すると一般に分散のためにパルス幅が広がってしまうが、負の分散をもった光ファイバー中ではある条件が満たされれば光カー効果による自己位相変調効果と負の分散が釣り合いパルス波形を維持したまま伝搬できるようになる。この状態を光ソリトンと呼ぶが、光ソリトン状態のモノサイクルパルスは存在しえるか？ またこのとき図1に示したような位相は維持したまま伝搬するのか、それとも位相は逐次変化するのか？
- (4) 図1(a)の電場は正の側には大きく振れているが負の側には小さくしか振れておらず、電場を時間平均するとゼロにはならない。このようなことは許されるのか？

モノサイクルパルスの世界はすぐそこまで来ているような気がする一方で、まだまだ遠い気もする。モノサイクルパルスの世界は何が待っているか？ 本記事をきっかけに考えていただければ幸いである。読者からの反響をお待ちしている。この記事に関してのご意見は、itoh@bk.tsukuba.ac.jp あるいは、optics@kobe-u.ac.jp までお寄せください。

文 献

- 1) 例えば, Y. R. Shen: *The Principles of Nonlinear Optics* (J. Wiley & Sons, New York, 1984).
- 2) G. Tempea, M. Geissler and T. Brabec: *J. Opt. Soc. Am. B*, **16** (1999) 669.
- 3) T. Brabec and F. Krausz: *Phys. Rev. Lett.*, **78** (1997) 3282.
- 4) U. Morgner, F. X. Kaertner, S. H. Cho, Y. Chen, H. A. Haus, J. G. Fujimoto, E. P. Ippen, V. Scheuer, G. Angelow and T. Tschudi: *Opt. Lett.*, **24** (1999) 411.
- 5) L. Xe, Ch. Spielmann, A. Poppe, T. Brabec, F. Krausz and T.W. Haensch: *Opt. Lett.*, **21** (1996) 2008.
- 6) 石田祐三: *応用物理*, **65** (1996) 857.
- 7) A. Baltuska, M. S. Pshenichnikov and D. A. Wiersma: *IEEE J. Quantum Electron.*, **35** (1999) 459.